

# 小惑星リュウグウ表層を模擬したサイズ分布を持つボルダー模擬物質への クレーター形成実験

保井 みなみ<sup>1</sup>, 荒川 政彦<sup>1</sup>, 大川 初音<sup>1</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>

1. 神戸大学大学院理学研究科 2. 宇宙科学研究所

はじめに：小惑星リュウグウは大小様々なボルダーで覆われている。ボルダーに衝突体が衝突すると、armoring 効果によってクレーター形成効率が低下することが予測されていたが、リュウグウで行われた SCI 実験で形成したクレーターは、細粒砂の重力支配域のクレータースケール則の予測値とほぼ一致した[Arakawa et al., 2020]。粗粒標的に対するクレーター実験では、標的粒子と弾丸の直径比が 1 を超えると、クレーター形成効率が低下することがわかっている[e.g., Tatsumi & Sugita, 2018]。しかしこれらの先行研究は単一サイズの標的粒子を使っており、リュウグウのようなボルダーのサイズ分布を考慮していない。そこで本研究では、リュウグウの表層を模擬したサイズ分布をもつ標的粒子を用いたクレーター実験を行い、armoring 効果によるクレーター形成効率の減衰率を調べた。

実験方法：標的粒子には直径 0.1, 1, 3, 10mm のガラスビーズを用いた。標的は 3 種類用意した。1 つは 4 種類のビーズを等質量で混合した標的（4 種混合, Mix F）、2 つ目は 0.1mm を除く 3 種類のビーズを等質量で混合した標的（4 種混合, Mix T）、3 つ目は 0.1mm ビーズのみの標的である。実験は神戸大学と宇宙科学研究所の 2 ヶ所で行った。衝突速度は 52m/s~4.4km/s の範囲で行い、直径 1, 2, 3mm の密度の異なる 8 種類の弾丸を用いた。

実験結果：本研究で用いたクレータースケール則は、Housen et al. (1983)が提案した重力支配域のクレーターサイズに関するスケール則（1 式）である。

$$R \left( \frac{\rho_b}{m_p} \right)^{1/3} = H_1 \left( \frac{r_p g}{v_i^2} \right)^b \left( \frac{\rho_b}{\delta} \right)^c, \quad (1)$$

$R$ はクレーターの見かけ半径、 $m_p$ は弾丸質量、 $r_p$ は弾丸半径、 $\delta$ は弾丸密度、 $\rho_b$ は標的のバルク密度、 $v_i$ は衝突速度、 $g$ は重力加速度である。 $R$ はレーザー変位計を用いて測定したクレーター断面図から求めた。また、1 式の各項は $\pi_R = R(\rho_b/m_p)^{1/3}$ 、 $\pi_2 = r_p g/v_i^2$ 、 $\pi_4 = \rho_b/\delta$ と書く。 $\pi_4$ のべき  $c$ は、 $\pi_2$ を一定にした場合の実験結果から求めた。

図 1 にその結果を示す。3 種混合と 4 種混合は、0.1mm 標的よりもクレーター形成効率が小さくなった。これは、混合標的の方が安息角が大きいに起因する。低速度 ( $\pi_2 > 3 \times 10^{-7}$ ) では、混合標的でも 10mm ビーズに衝突すると (C-10)、クレーター形成効率がさらに低下した。高速度 ( $\pi_2 < 3 \times 10^{-9}$ ) では、4 種混合 (C-10 以外) と C-10 の  $\pi_R/\pi_4^c$  が近付き、 $\pi_2 = 3 \times 10^{-10}$  でほぼ一致した。これらの結果を 1 式を用いてフィッティングすると、0.1mm は  $H_1 = 1.02$ ,  $b = -0.16$ , 4 種混合は  $H_1 = 0.74$ ,  $b = -0.17$ , C-10 は  $H_1 = 0.49$ ,  $b = -0.18$  となった。なお、3 種混合は高速度のデータが無いので、クレータースケール則は得られなかった。

議論：得られた C-10 のスケール則を，4 種混合のスケール則を用いて説明することを試みる．その際，弾丸の運動量が最初に接触した 10mm ビーズに輸送され，そのビーズが加速して周囲のビーズに衝突すると仮定する．その結果，1 式は 2 式のように書き換えられる．

$$R \left( \frac{\rho_b}{m_t} \right)^{1/3} = H_1 \left( \frac{r_t g}{v_t^2} \right)^b \left( \frac{\rho_b}{\rho_t} \right)^c, \quad (2)$$

$m_t$ ,  $r_t$ ,  $\rho_t$  は最初に接触したビーズの質量，半径，密度， $v_t$  は運動量輸送効率  $\beta$  を用いて， $v_t = \beta m_p v_i / m_t$  と書ける．2 式を  $\pi$  パラメータを用いて整理すると， $\pi_R = f(\phi) H_1 \pi_2^b \pi_4^c$  となり， $f(\phi) = \beta^{-2b} (\rho_t / \delta)^{1/3+2b-c} \phi^{1+7b}$  は armorings 効果によるクレーター形成効率の減衰率となる． $\phi$  は標的粒子と弾丸の半径比  $r_t / r_p$  である．また，C-10 の結果を用いて  $\beta$  と  $v_i$  の関係を調べた結果，弾丸の種類に関わらず， $\beta - 1 = (8.99 \times 10^{-3}) v_i^{0.63}$  となった．以上から，サイズ頻度分布をもつガラスビーズ標的のクレーターサイズに関するスケール則は，以下のように書くことができた．

$$\pi_R / \pi_4^c = H_1 [1 + (8.99 \times 10^{-3}) v_i^{0.63}]^{-2b} (\rho_t / \delta)^{1/3+2b-c} \phi^{1+7b} \pi_2^b, \quad (3)$$

3 式を用いて様々なボルダーに衝突した場合の armorings 効果による減衰率を調べたのが，図 2 である．3 式の  $H_1$ ,  $b$ ,  $c$  は 4 種混合のスケール則の値を用いた．図 2 から，衝突速度の範囲によって，armorings 効果が効くボルダー半径が異なることがわかった．例えば，メインベルト小惑星の衝突速度範囲では衝突体の約 6 倍，地球近傍小惑星では約 15 倍であることがわかった．

図 1

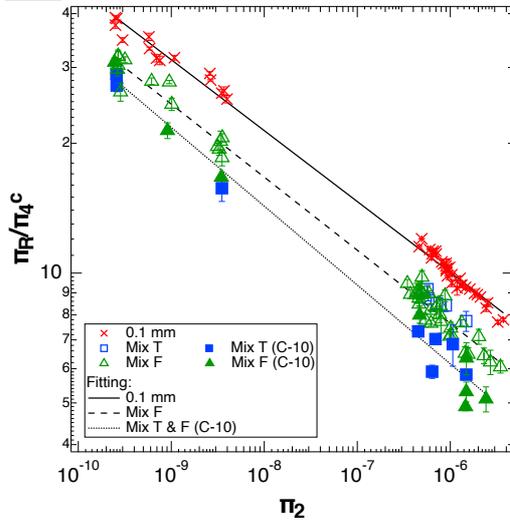


図 2

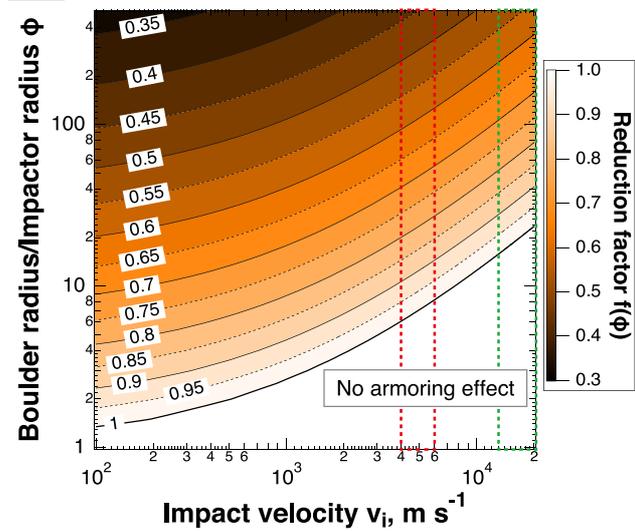


図 1：無次元パラメータ  $\pi_R / \pi_4^c$  と  $\pi_2$  の関係．各線は式 1 を用いてフィッティングした結果を示す．

図 2：armorings 効果によるクレーター形成効率の減衰率に対する衝突速度とボルダーサイズの依存性．各線は減衰率の等値線を示し，カラーバーは減衰率を示す．1 の等値線より下は armorings 効果はない．赤の棒がメインベルト小惑星の平均衝突速度 [Bottke et al., 1994]，緑の棒が地球近傍小惑星の平均衝突速度 [Moonhead, 2018] を示す．

この発表は，Yasui et al. (2022), JGR: Planets, 127, e2021JE007172 に基づき，一部を抜粋したものである．詳細は上記論文を参照していただきたい．